

선조사 결과에 의한 실제낙석무게분포의 추정과 설계적용성 검토 Estimation In-Situ Rockfall Block Weight Distribution Using Scan-Line Survey Results and Examination its applicability in Practical Rockfall Analysis

김수철¹⁾, Su-chul Kim, 김동휘²⁾, Dong-Hee Kim, 정혁일³⁾, Hyuk-il Jung, 김석기⁴⁾, Seok-ki Kim

- 1) 서영엔지니어링 지반터널설계실 과장, Section chief, Geotechnical Div., SeoYeong Engineering.
- 2) 서영엔지니어링 지반터널설계실 과장, Section chief, Geotechnical Div., SeoYeong Engineering.
- 3) 서영엔지니어링 지반터널설계실 차장, Senior Manager, Geotechnical Div., SeoYeong Engineering.
- 4) 바우컨설팅 지반/터널부 상무, Executive Director, Geotechnical/Tunnel Div., BAU Consultant.

SYNOPSIS : Up to now, practical engineers applying simplicity value of rockfall block weight suggested in design manual without considering in-situ rockfall block weight which reflect joint characteristics. However, the size of rockfall block varies with joint spacing of discontinuities and influences over rockfall analysis results. In this paper, we estimate realistic rockfall block weight distribution using statistical invariances of joint spacing derived from scan-line survey result. And, we study whether this distribution is applicable in practical rockfall analysis directly. As the results of this study, rockfall analysis results that using rockfall block weight distribution estimated from scan-line survey show resonable and realistic outcomes.

Key words : rockfall, rockfall analysis, scan-line survey, joint spacing

1. 서론

본 과업구간은 경남 진해시 안골동에 위치한 옥망산으로 북컨테이너 2-1단계의 '08. 7월 적기 개장을 위해 석산개발이 진행 중에 있으며, 부지조성이 완료 후에는 180m이상의 대절토 암반사면이 형성될 예정이다.

대절토 사면에 대한 안정성 검토 결과 진도과과 가능성이 있으며, 단층선구조에 의한 풍화대 검토, 시추조사에 의한 암질분석, 시추코아내 절리에 의한 파쇄 등을 고려할 때 대절토 사면 상부에서 낙석발생 가능성이 존재하고 있는 것으로 판단되었다.

낙석발생시 큰 에너지를 발생시켜 컨테이너 부두 부지내의 인명 및 재산상의 손실을 가져올 수 있으므로, 낙석에 대한 대책 수립시 낙석방지책 설치여부 및 낙석 발생시 운동에너지가 단계적으로 흡수되도록 적정 사면을 계획함에 있어서 중요한 변수중 하나는 낙석무게를 결정하는 것이다.

일반적으로 현장 조사자료가 불충분하거나 현장접근의 어려움으로 인해 조사가 어려운 경우 기존 설계기준에 따라 최대낙석무게를 이용하는 경우가 일반적이다.

본 논문에서는 선조사결과를 이용하여 현장낙석무게분포를 산정하고, 이를 직접 낙석안정검토시 입력자료로 활용하여 설계 실무에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 선조사에 의한 블록크기 추정

하나의 암반블록을 여러 방향의 절리로 나누어져 있다고 가정하면, 직각방향에 따른 절리군 간격을 S_1, S_2, S_3 , 각 방향의 평균불연속면의 개수를 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 라고 할 때, 이들 간의 관계는 다음의 식(1)과 같이 표현된다.

$$S_1 = \frac{1}{\lambda_x}, \quad S_2 = \frac{1}{\lambda_y}, \quad S_3 = \frac{1}{\lambda_z} \quad (1)$$

암반블록의 단위체적당 교차하는 불연속면의 수인 체적절리계수 J_v 는 다음과 같이 정의되며, Random Joint에 대한 고려항인 $Nr/5$ 는 경험적 수치이다.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{Nr}{5} \quad (2)$$

Palmstrom은 일반적으로 암반블록의 교차각이 거의 90° 에 가까우므로, 낙석가능블록의 체적을 식(3)과 같이 표현하였다.

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \frac{1}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3} \doteq \beta \cdot J_v^{-3} \quad (3)$$

블록의 형상계수 : $\beta = \frac{(a_2 + a_2 \times a_3 + a_3)^3}{(a_2 \times a_3)^2}$, ($a_2 = S_2/S_1, a_3 = S_3/S_1$)

세 절리군이 있는 암반블록면의 교차각 : $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$

블록의 형상계수 β 는 그림 1과 같이 블록의 형상과 치수의 비율에 따라 표현되며, 블록이 6개면보다 많이 형성되거나 불명확한 형상일 경우에는 $\beta = 20 + 7 a_3/a_1$ (a_3 : 블록의 가장 긴 치수, a_1 : 블록의 가장 짧은 치수)를 적용하고, β 의 값이 불명확한 경우 36을 권장하였다.

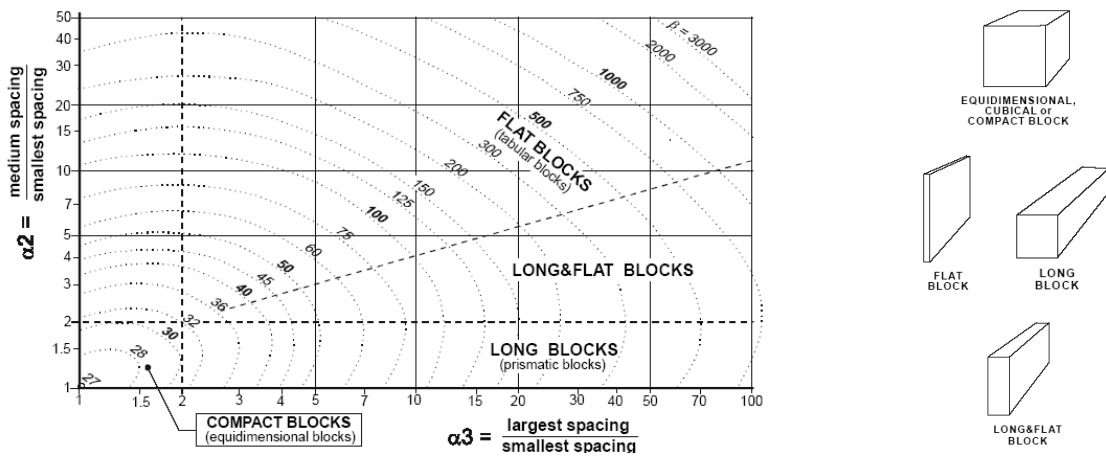


그림 1. 블록형상에 따른 형상계수 β 의 변화(Palmstrom, 1995)

2.2 시추조사에 의한 블록크기 추정 방법

Palmstrom(1982)은 RQD와 J_v 와의 관계를 식(4)로 나타내고 RQD에 따른 J_v 의 범위를 결정하였다.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (4)$$

여기서, $J_v > 35$ 이면 $RQD = 0$, $J_v < 4.5$ 이면 $RQD = 100$

그러나, 시추코아에서 얻어진 RQD에 의해 추정된 J_v 값은 그림 2에 보이는 바와 같이 상·하한값을 가지기 때문에 RQD에 의해 얻어진 J_v 값으로는 약 0.001~0.2m³ 범위내의 블록크기만 합리적인 추정 가능하다는 문제점을 내포하고 있다.

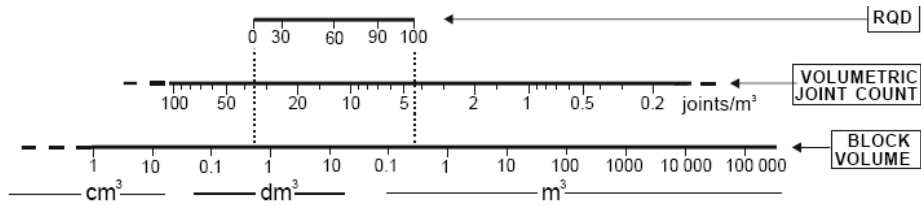


그림 2. RQD값의 분포와 블록체적, J_v 와의 관계

3. 설계적용 낙석무게분포의 결정

3.1 선조사(Scanline survey)결과에 의한 낙석분포 추정

과업구간 일대에 지표지질조사를 수행하여 얻어진 분포암종, 단층구조선의 위치 및 특성을 그림 3에 나타내었다.

단층선구조는 대체로 70~90°의 고경사로 남쪽으로 경사를 이루고 있으며, 단층대에는 일반적으로 장경 2~3cm 크기의 단층각력암과 단층점토를 함유하며, 단층점토의 폭은 수 cm에서 최대 20cm 정도를 나타내고 있다. 일부 산성암맥의 경우 풍화에 약해 쉽게 부서지는 경향을 보이기도 하며, 이동방향에

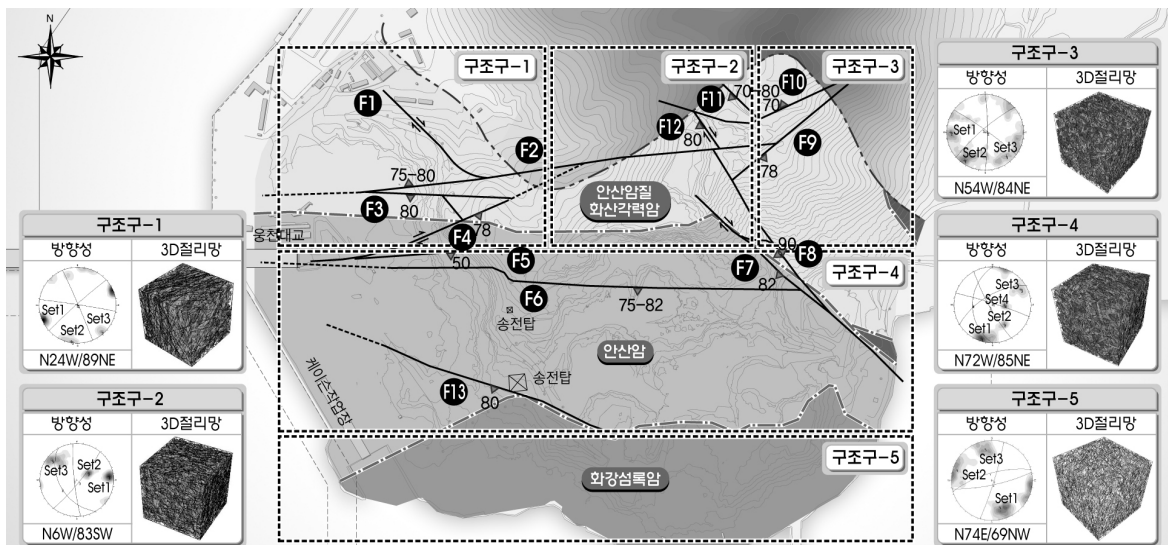


그림 3. 구조구 분석결과

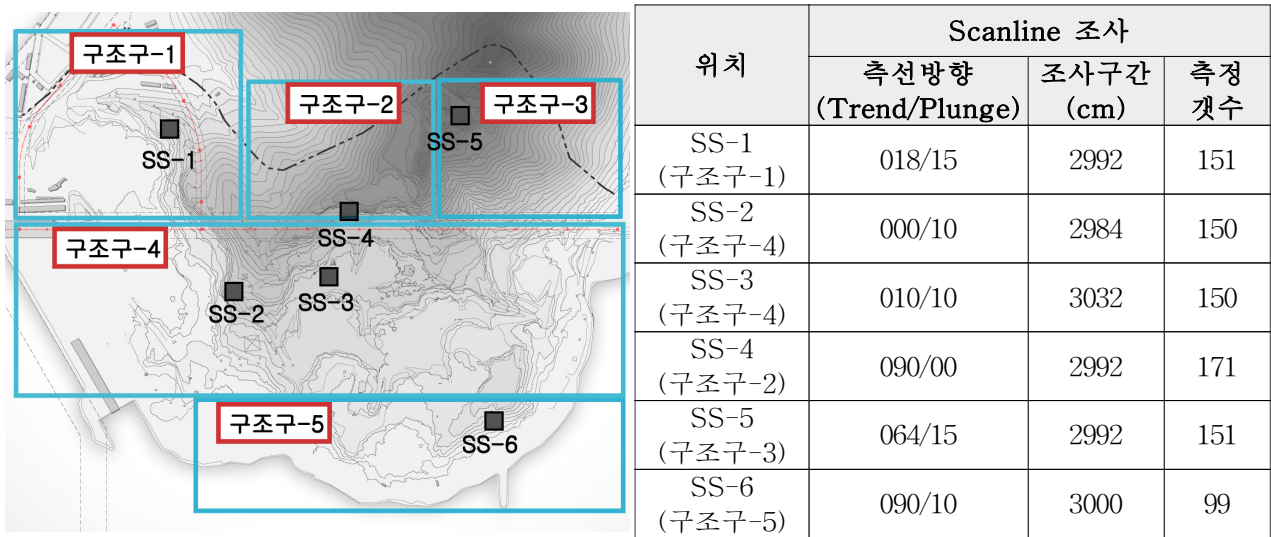


그림 4. 선조사(Scan-line Survey) 위치 및 현황

따라 정단층, 우수향 주향단층, 좌수향 주향이동 단층, 사교단층 등이 다양하게 분포하고 있다.

이러한 단층 선구조의 특성 및 위치에 의하여 5개의 구조구로 구분, 각 구역을 대표하는 총 6개의 선 조사를 수행하였으며, 구조구별 선조사 현황은 그림 4와 같다.

표 1. 구조구-1, 2, 3 선조사 결과

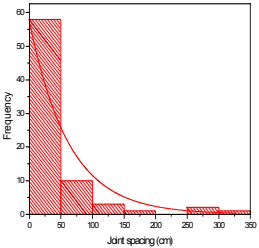
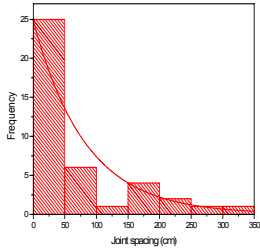
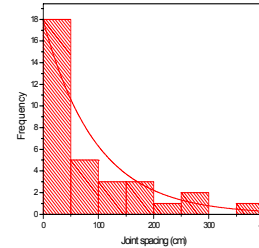
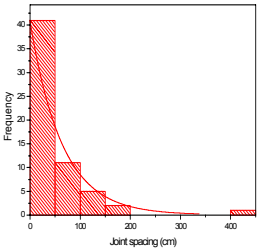
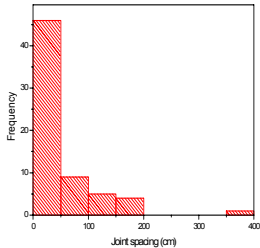
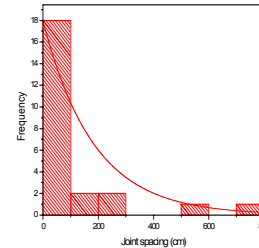
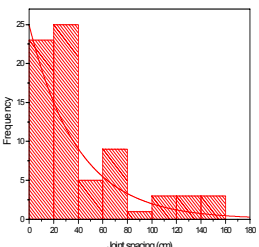
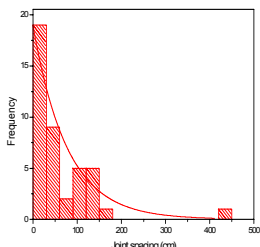
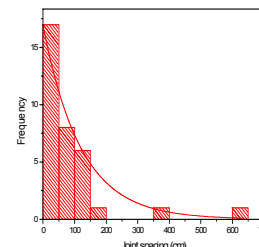
구 분		Set 1	Set 2	Set 3
구조구-1 (SS-1)	방향	N24W/89NE	N48E/86NW	N81W/88NE
	평균간격/연장	0.10	0.41	0.29
	선밀도(개/m)	3.95	1.47	1.28
	불연속면의 거칠기(JRC)	4.7	5.37	4.83
	불연속면의 벽면강도(JCS)	62.02	61.90	61.15
	거칠기	Smooth Plannar	Smooth Plannar	Smooth Plannar
	벽면상태	MW	MW	MW
	틈새	Gapped-Tight	Gapped-Tight	Gapped-Tight
	충전물	-	-	-
구조구-2 (SS-4)	방향	N06W/83SW	N29W/42SW	N39E/82SE
	평균간격/연장	0.28	0.17	0.49
	선밀도(개/m)	2.53	2.88	2.99
	불연속면의 거칠기(JRC)	8.44	7.92	8.00
	불연속면의 벽면강도(JCS)	60.76	59.40	59.55
	거칠기	Smooth Plannar	Smooth Plannar	Smooth Plannar
	벽면상태	MW	MW	MW
	틈새	Gapped-Tight	Gapped-Tight	Gapped-Tight
	충전물	-	-	-
구조구-3 (SS-5)	방향	N54W/84NE	NS/83E	N49E/79NW
	평균간격/연장	0.17	0.15	0.15
	선밀도(개/m)	4.87	5.45	5.59
	불연속면의 거칠기(JRC)	8.30	8.59	7.63
	불연속면의 벽면강도(JCS)	58.77	60.52	64.03
	거칠기	Smooth Plannar	Smooth Plannar	Smooth Plannar
	벽면상태	MW	MW	MW
	틈새	Gapped-Tight	Gapped-Tight	Gapped-Tight
	충전물	-	-	-

5개구조구 중 영구사면에 해당하는 3개(구조구-1(SS-1), 구조구-2(SS-4), 구조구-3(SS-5))의 지역에 대한 절리분석 결과를 표 1에 나타내었다.

선조사결과에 의해 얻어진 절리자료의 통계분석을 수행하여 현장절리간격분포를 음지수분포로 채택하였다. 각 구조구별 절리간격의 분석된 통계량을 표 2에 나타내었으며, 이를 통계량으로 활용하여 각 절리군 간격에 대한 300개의 난수를 발생시키고, 식(2), (3)을 활용하여 블록크기분포를 얻었다.

이때, 선조사결과는 한 면에서만 측정된 결과로서 각 절리군간의 방향성 검토를 통해 블록의 형성가능 여부를 판단해야 한다.

표 2. 절리간격의 통계량 분석결과

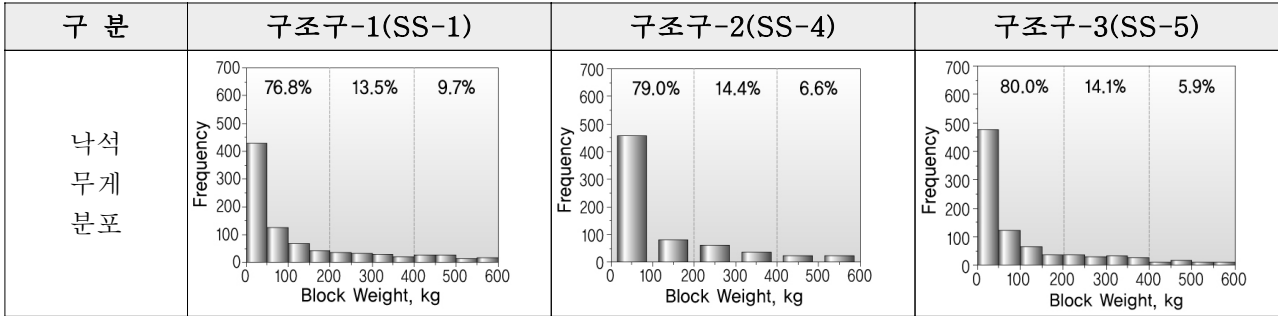
위 치	절리군별 절리간격					
	Set 1		Set 2		Set 3	
구조구 -1 (SS-1)						
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
	38.6	62.1	69.3	82.2	81.8	95.3
	K-S value	P-value	K-S value	P-value	K-S value	P-value
	0.2427	0.0003	0.1959	0.0805	0.1666	0.2859
구조구 -2 (SS-4)						
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
	49.0	63.8	44.6	61.5	105.9	182.9
	K-S value	P-value	K-S value	P-value	K-S value	P-value
	0.1495	0.137	0.1933	0.0155	0.2392	0.1082
구조구 -3 (SS-5)						
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
	41.4	39.5	60.5	77.6	85.0	120.2
	K-S value	P-value	K-S value	P-value	K-S value	P-value
	0.0859	0.6621	0.1713	0.151	0.1036	0.8226

각 절리군간의 방향성검토를 통해 블록이 생성되는 절리조합을 표 3과 같이 얻었으며, 이 조합에 따라 절리간격 난수발생결과를 적용하여 구조구별 낙석가능블록의 분포를 표 4와같이 산정하였다.

표 3. 구역별 블록생성 절리조합

구 분	SS-1	SS-4	SS-5
블록생성 절리조합	set1-set2-set2 set1-set3-set3 set2-set3-set3	set1-set3-set1 set1-set3-set2	set1-set2-set1 set1-set3-set1 set2-set3-set3
비 고	3가지 블록 생성가능	2가지 블록 생성가능	3가지 블록 생성가능

표 4 절리간격 난수발생 결과에 의해 얻어진 구조구별 낙석무게분포



3.2 시추 조사결과에 의한 낙석분포 추정

시추조사에서 얻어진 RQD값을 활용하여 식(4)에 의해 J_v 값을 얻고 이를 식(3)에 대입하여 암반블록의 체적을 구하였다.

암반블록의 체적을 산정하기 위한 블록의 형상계수 β 는 입방체블록의 경우 27, 긴 평면블록의 경우 100, 일반적인 블록의 경우 36의 3가지로 가정하였으며 이 중에서 구조구-2지역의 시추자료에 의한 블록의 체적 산정결과를 표 5에 보였다.

표 5. 심도에 따른 RQD, J_v , 암반블록체적분포

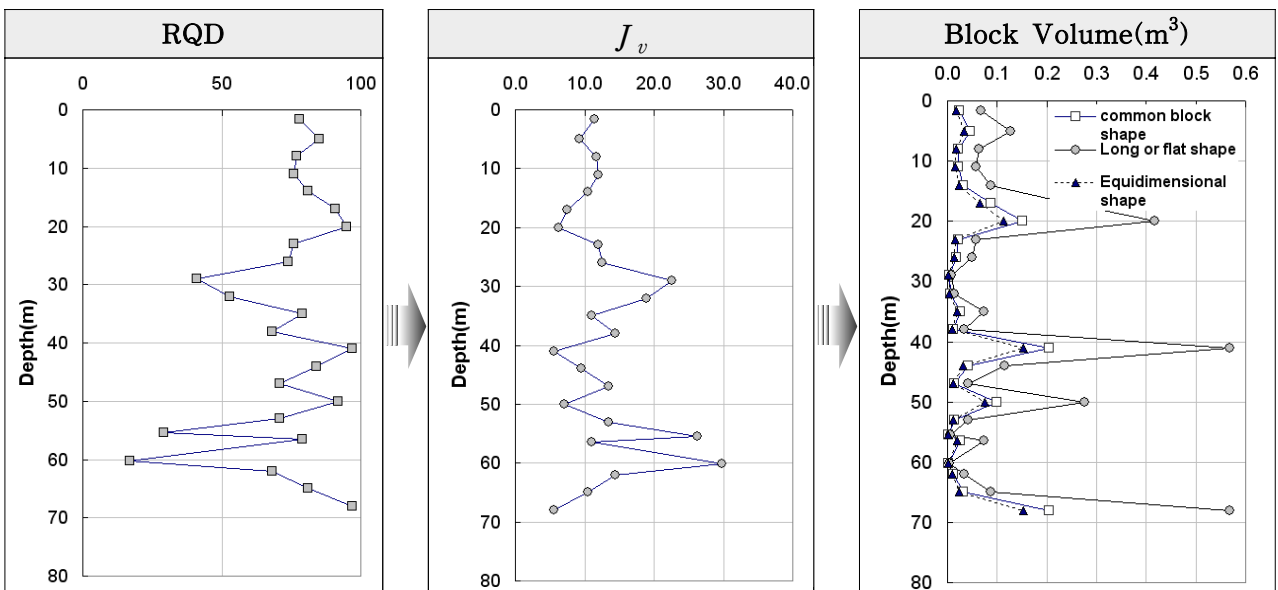
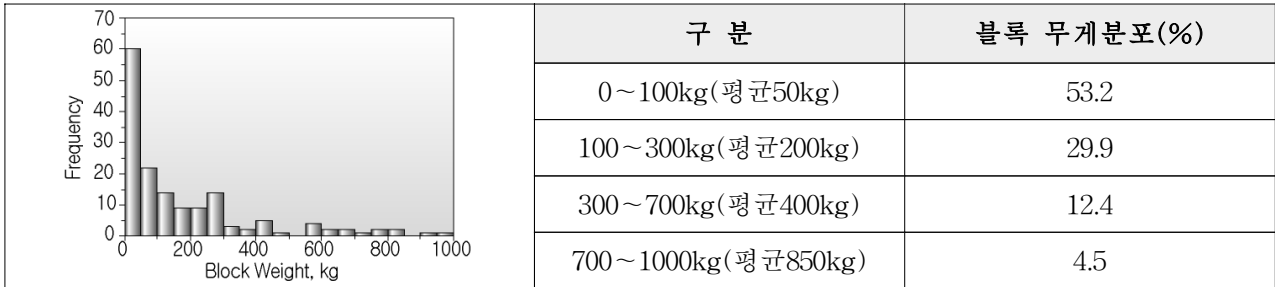


표 5와 같이 절취사면에 해당하는 모든 시추자료분석을 수행하여 종합한 결과를 히스토그램으로 나타내면 표 6과 같으며, 조사결과에 대한 낙석무게분포는 0~100kg(평균 50kg)은 53.2%, 100~300kg(평균 200kg)은 29.9%, 300~700kg(평균 500kg)은 12.4%, 700~1,000kg(평균 850kg)은 4.5%를 나타내었다. 이때, 지나치게 큰 규모의 블록이 계산된 이유는 앞서 언급한 바와 같이 RQD에 의한 Jv값의 추정의 한계점으로 인해 RQD가 0 또는 100에 지나치게 가까운 경우에는 비합리적인 블록크기가 산정되는 것으로 보이며, 이를 감안한다면 400kg 이하의 블록이 86.4% 이상으로 나타나, 선조사결과와 비슷한 결과분포를 보인다.

표 6. 시추조사결과에 의한 낙석무게분포



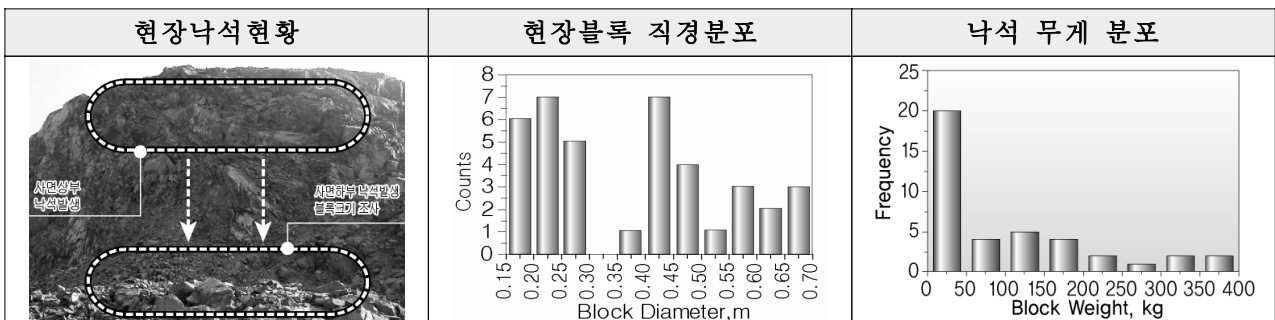
3.3 현장낙석크기 조사결과에 의한 비교검토

실측한 구조구-2지역 내 현장에서 발생된 낙석크기를 실측한 결과 그 크기는 0.15~0.70m까지 다양하게 분포하는 것으로 분석되었다

현장낙석크기 조사결과 직경 0~0.375m인 경우는 51.2%, 직경 0.375~0.525m인 경우는 29.3%, 직경 0.525~0.675m는 19.5%를 나타내었고, 무게분포로 분석한 결과, 무게 0~50kg(평균 25kg)인 경우는 50%, 무게 50~200kg(평균 125kg)인 경우는 32.5%, 무게 200~300kg(평균 250kg)인 경우는 7.5%, 무게 300~400kg(평균 350kg)인 경우는 10.0%를 나타내었다.

200kg 이하의 암반블록이 80%로 대부분을 차지하고 있으며, 낙석무게가 모두 400kg 이하인 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 선조사결과 200kg 이하의 낙석이 80%정도를 차지하고 있는 것과 유사하다.

표 7. 현장조사에 의한 낙석직경 및 무게분포



3.4 설계 기준과의 비교검토

선조사, 시추조사, 현장낙석크기를 비교해 보면, 선조사의 경우 400kg 이하블록이 90%이상으로 나타났고, 시추조사의 경우 400kg이하블록이 86.4%, 현장낙석 조사결과에서는 모두 400kg이하의 블록으로 조사되었다. 이는 현재 실무에서 적용되는 표 8의 기준과도 유사한 값이다.

표 8. 설계기준에 제시된 낙석무게

한국도로공사(2001.12)	한국지반공학회 봄학술발표회(2004.3)
조사자료가 없을 경우 400kg 적용	69개 발파법면 낙석조사 결과 대부분 0~0.12m ² (0~300kg)사이 분포

4. 낙석안정 검토결과

4.1 설계입력정수 결정

영구절토사면의 낙석안정검토를 수행하기 전에 표 4와 같은 낙석무게 분포와 표 8의 문헌자료에 의한 최대낙석무게를 적용한 경우 어떤 차이가 발생되며, 낙석방지책을 설치할 경우 충돌에너지 분포양상을 비교하여 대절토 사면에서의 설계적용가능성을 판단하였다.

낙석초기속도는 일반적으로 1.0~3.0m/sec이므로, 본 설계에서는 최대값인 3m/sec를 적용하였으며, 발파에 의해 절개면의 시공이 이루어지므로 절개면의 표면에 암반이 직접 노출되어 낙석의 반발계수도 증가할 것으로 판단하였다. 지표면에 대한 반발계수는 문헌에서 제시되는 값을 이용하여 절토면은 암반 노두가 분포하는 상태로, 소단부위는 잡석과 식생이 분포되는 것으로 모사하여 검토를 수행하였다.

표 9. 설계적용 반발계수

구분	소단부위(Talus with vegetation)	연암 및 경암(Bedrock Outcrops)
수직반발계수(Rn)	0.32	0.35
접선반발계수(Rt)	0.8	0.85

4.2 낙석무게적용방식에 따른 비교검토

영구절취사면에 해당하는 3개 구조구 중 구조구-3의 결과를 가지고 낙석비교검토를 수행하였다.

낙석안정검토에는 Rocfall 프로그램을 적용하였으며, 표 10에서와 같이 최대 낙석무게를 적용한 경우는 Point Seeder 방식, 낙석분포무게를 고려한 경우에 대해 Line Seeder 방식을 적용하여 각각의 낙석무게분포를 재현할 수 있도록 하였고, 각각 100개의 난수를 발생시켰다.

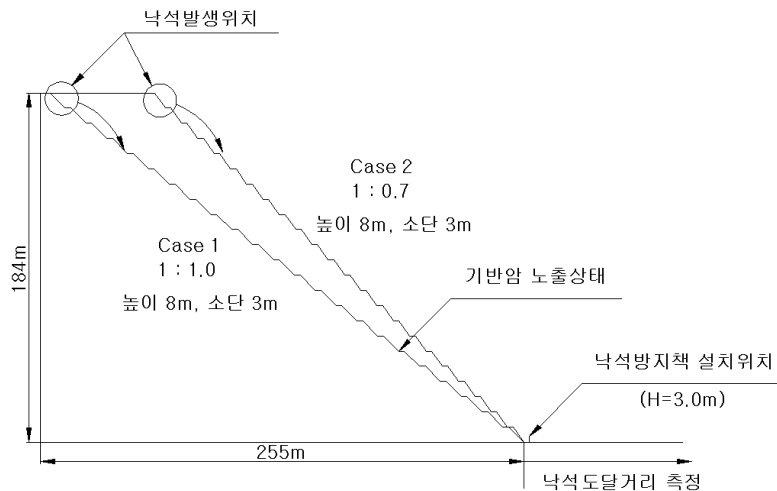


그림 5. 해석검토 단면

표 10. 낙석무게 적용방식

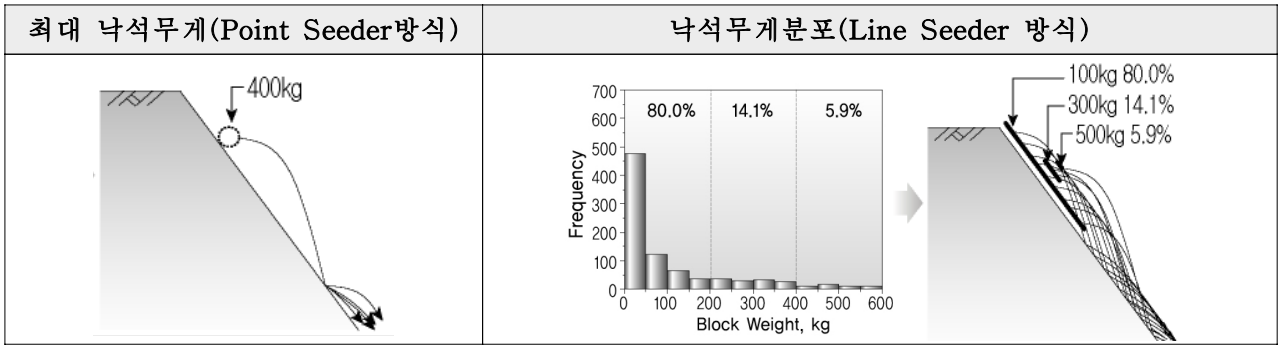
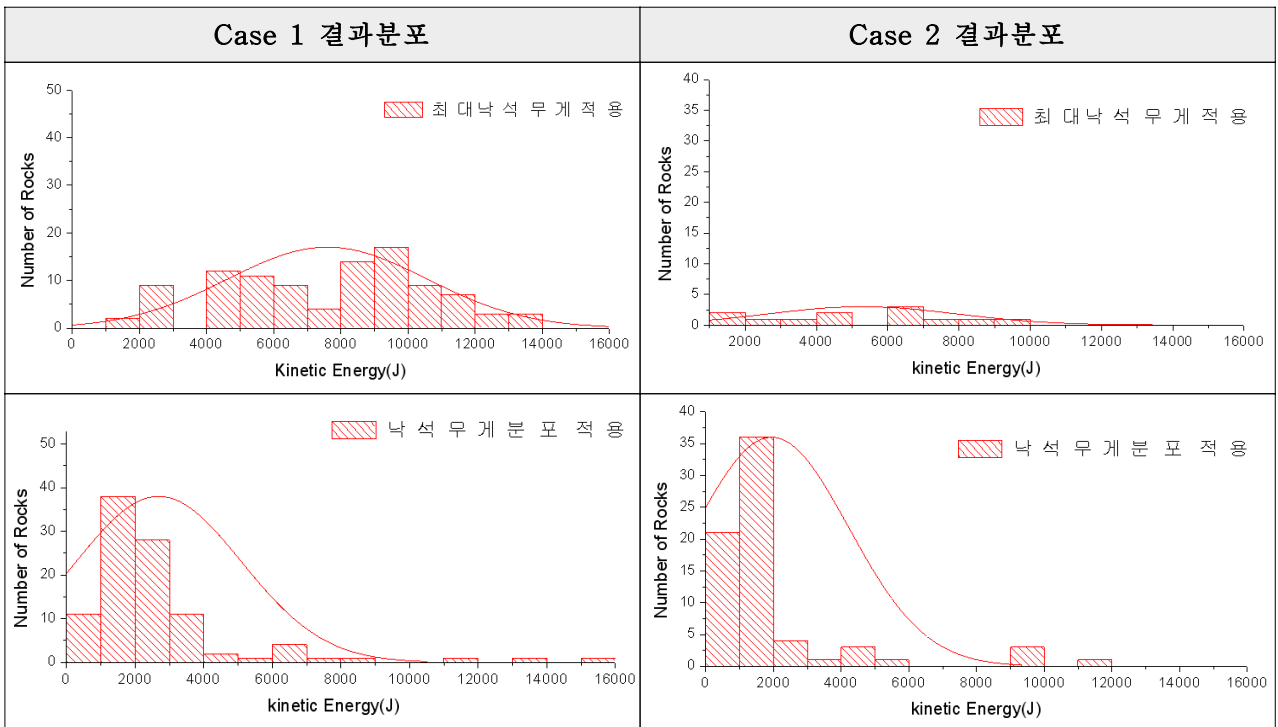


표 11. 낙석 검토결과 요약

구 분		최대도달거리 (m)	최대반발높이 (m)	낙석방지책 설치 시 충돌에너지(J)
Case 1	최대낙석무게 적용	16.2	6.4	13,570
	현실적 낙석분포 적용	13.3	5.8	15,378
Case 2	최대낙석무게 적용	16.5	7.1	9,149
	현실적 낙석분포 적용	14.9	7.2	11,406

표 12. 낙석방지책 설치시 충돌에너지 분포



낙석 안정검토결과는 표 11과 12와 같다.

결과에서도 알 수 있듯이 낙석검토 결과에서 나타나는 최대도달거리, 최대반발높이, 최대충돌에너지 등은 최대낙석무게 적용시와 현실적 낙석무게분포 적용시 난수발생에 따른 약간의 차이는 발생하나 큰 차이를 보이지 않는다.

낙석방지책 설계 시 의미를 갖는 값은 최대 충돌에너지로 현실적 낙석분포를 적용할 경우 현재 적용되고 있는 설계기준에 부합하는 결과이며, 낙석발생 무게가 평균 200kg정도의 무게분포가 대부분이어서 충돌에너지가 대부분 낮은 에너지 분포를 보이는 차이점이 있다.

이는 실제 낙석무게분포를 적용할 경우 실제와 유사한 낙석에너지의 분포를 획득할 수 있고, 이를 분석하면 낙석방지책의 파괴가능성을 정량적인 확률값으로 추정할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

현장에서의 선조사결과를 활용하여 낙석무게분포를 산정하고, 그 결과 낙석안정검토에 대한 설계 적용성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 낙석안정검토시 최대낙석무게를 적용한 경우와 낙석무게분포를 적용할 경우, 최대 충돌에너지는 큰 차이가 발생하지 않았으며, 선조사결과로부터 추정된 낙석무게분포를 설계에 직접 활용하였을 때 현실적이고 합리적인 낙석검토의 수행이 가능하였다.
- 2) 실제 발생하는 낙석의 크기는 현장암반의 절리간격에 따라 크게 변화하므로, 현장암반의 절리특성분석결과를 적극 활용하여 현실적인 낙석분포를 설계실무에 적용한다면, 설계기준의 맹목적 적용으로 인한 낙석방지책의 과다설계를 방지할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 한국도로공사(2001), 제2권 한국도로공사 설계요령 토공 및 배수, pp.247~248.
2. 김수로 외(2004), "사면안정성 요인에 대한 발파패턴의 영향", 한국지반공학회 2004 봄학술발표회 논문집, pp.618.
3. Palmstrom, A.(1982), "The volumetric joint count a useful and simple measure of the degree of jointing", *Proc. int. congr. IAEG*, NEW Delhi, pp.221~228.
4. Palmstrom, A.(1995), "RMi-a rock mass characterization system for rock engineering purposes" *Ph.D thesis, University of Oslo*, Norway, pp.409.
5. Sharma, V. M. and Saxena, K. R.(2001), *In In-Situ characterization of rocks*, A. A. Balkema Publishers, pp.49~97.
6. Sen and Eissa, A.(1992), "Rock Quality Charts for Log-normally Distributed Block Size", *Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 29, No.1, pp.1~12.